

Є.М. Бабич, В.С. Довбенко

**РОЗРАХУНОК  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК,  
ПІДСИЛЕНИХ  
ПОЛІМЕРНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ**



**Міністерство освіти і науки України**

**Національний університет водного господарства  
та природокористування**

*Є.М. Бабич, В.С. Довбенко*

**РОЗРАХУНОК  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК,  
ПІДСИЛЕНИХ ПОЛІМЕРНОЮ  
КОМПОЗИЦІЄЮ**

**Рекомендації**

Рівне - 2014

УДК 624.012  
ББК -002\*3,2:38.53:38.36  
Б 12

*Рекомендовано до видання Вченою радою Національного  
університету водного господарства та природокористування  
(Протокол № 8 від 26.09.2014 року)*

**Бабич Є.М., Довбенко В.С.**

Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією: Рекомендації. - Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2014. - 28 с.

**Рецензенти:**

**Дворкін Л.Й.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП, м. Рівне

**Масюк Г.Х.**, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд НУВГП, м. Рівне

В рекомендаціях наведено методику розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за граничними станами другої групи. Методика розроблена на основі деформаційної моделі, має задовільну збіжність з експериментальними даними та відповідає вимогам чинних норм проектування ДБН В.2.6-98:2009 та ДСТУ Б.В.2.6-156:2010.

Для інженерно-технічних працівників проектних організацій та виробничих підприємств, наукових працівників, докторантів та аспірантів будівельних спеціальностей.

УДК 624.012  
ББК -002\*3,2:38.53:38.36  
Б 12

© Бабич Є.М., Довбенко В.С., 2014  
© Національний університет водного  
господарства та природокористування, 2014

## Зміст

1. Загальні положення .....	4
2. Характеристика полімерної композиції проникаючої дії на основі поліізоціанату .....	5
3. Технологія підсилення .....	7
4. Експериментальне обґрунтування підсилення конструкцій, полімерною композицією проникаючої дії на основі поліізоціанату .....	8
5. Рекомендації щодо розрахунку граничних станів за придатністю до експлуатації (друга група) .....	10
6. Приклад розрахунку .....	16
Література .....	22



## 1. Загальні положення

1.1. В процесі експлуатації будівельні конструкції будівель та споруд втрачають свої початкові міцнісні та деформативні властивості. Підсилення, відновлення та ремонт конструкцій будівель та споруд потребує пошуку нових раціональних і економічно обґрунтованих конструктивних рішень.

1.2. Традиційні методи, способи і матеріали підсилення потребують значних матеріальних затрат та часу виконання робіт, тому рекомендуються прості і надійні методи підсилення на основі полімерних матеріалів, які складають альтернативу підсиленню традиційним методам (розчин, бетон, арматура, металопрокат тощо).

1.3. За останній час в області технологій полімерних матеріалів досягнуто значного успіху. Особливе місце серед всіх полімерних матеріалів займає полімерна композиція, в основу якої входить мономер - поліізоціанат, який характеризується низькою вартістю, трудомісткістю та високою економічною ефективністю.

1.4. Новизна технології проникаючої дії полягає в можливості швидкого підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій полімерною композицією без порушення статичної конструкцій. Крім того, полімерну композицію можна ефективно використовувати для "лікування" тріщин в бетоні та захисту його від корозії.

1.5. Успішне застосування полімерних матеріалів як засобів і методів підсилення, на даний час, стримується певними факторами, а саме:

- невеликим досвідом застосування;
- недостатньою кількістю наукових досліджень;
- відсутністю розрахунково - нормативної бази, яка була б адаптована до чинних нормативних документів.

1.6. Для створення теорії міцності та надійності конструкцій, підсилених полімерною композицією, необхідно вивчення особливостей структури просоченого бетону. Структура бетону, просоченого полімерною композицією,

визначається його властивостями і залежить від структури непідсиленого бетону та використаного полімеру.

1.7. На сьогодні, відсутня методика розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій, підсилених полімерними композиціями проникаючої дії.

1.8. Дані рекомендації розроблено на основі чинних норм проектування бетонних та залізобетонних конструкцій ДБН В. 2.6-98:2009, ДСТУ Б В.2.6-156:2010, європейських норм EN 1992 Eurocode 2 та на основі експериментальних даних.

1.9. В даних рекомендаціях наведено методику розрахунку граничних станів за придатністю до нормальної експлуатації (друга група) залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією.

## 2. Характеристика полімерної композиції проникаючої дії на основі поліізоціанату

2.1. В якості підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій рекомендується застосовувати полімерну композицію, яка відноситься до групи матеріалів проникаючої дії. Дана композиція є останньою модифікацією полімерних композицій на основі поліізоціанатів, яку розроблено під керівництвом професора Р.О. Веселовського [11, 12].

2.2. Полімерну композицію рекомендується застосовувати одно- або двокомпонентною, яка за зовнішнім виглядом нагадує гас [13, 14]. Основним компонентом якої є спеціальний мономер - поліізоціанат (низькомолекулярна речовина), який після полімеризації (хімічна реакція, при якій з низькомолекулярної речовини утворюється високомолекулярна сполука) перетворюється в полімер, твердіння якого відбувається під дією катіонів солей та основ, що завжди присутні в структурі бетону.

2.3. В якості компонентів композиції використано органічні матеріали: поліізоціанат, етилацетат та трихлоретилфосфат. Детальне дозування та співвідношення компонентів наведено в [13, 14]. Для виготовлення полімерної



композиції на основі поліізоціанату, як приклад, можна застосовувати неочищений 4,4 - дифенілметандіізоціанат. В якості розчинника - хімічно чистий етилацетат. Зважаючи на це, можуть бути використані інші речовини, що відносяться до ізоціанатних груп.

2.4. Композиція на основі поліізоціанату має ряд переваг у порівнянні з іншими композиціями, так як затверджувачем частково або повністю служить вода або луг. При поверхневому нанесенні на бетонні чи залізобетонні конструкції композиція проникає та просочує пори і хімічно взаємодіє з бетоном. Після взаємодії утворюється новий композиційний матеріал, що відрізняється від необробленого матеріалу своєю високою міцністю, тріщиностійкістю, низькою деформативністю та одночасно виконує наступні функції:

- проникає в об'єм і заповнює структуру пор;
- зміцнює поверхневі шари бетону;
- утворює захисне гідрофобне покриття;
- створює допоміжний адгезійний шар при накладанні нового будівельного розчину на "стару" поверхню;
- захищає поверхню від дії агресивного середовища та проникнення вологи, грибків та інших бактерій.

2.5. Рідкий мономер перетворюється в твердий полімер, щільно заповнюючи, ніби заклеюючи всі пори та дефекти бетону. Утворений полімер має такий же елементний склад, як і вихідна речовина - мономер.

2.6. Процес полімеризації мономеру поліізоціанату проходить при температурі (+5...+25 °C) на протязі 24 год. Твердий полімер є екологічно безпечним, не токсичним і не горючим.

2.7. Полімерна композиція характеризується високими адгезійними властивостями. Для залізобетонних конструкцій особливий інтерес представляє здатність просочувати продукти корозії металу та в подальшому запобігати можливості її виникнення.

2.8. Полімерна композиція для використання в якості підсилення виготовляється в готовому вигляді та є простою в

застосуванні (продукцію наносять на поверхні бетонних та залізобетонних елементів за допомогою пензля, валика або механічним способом).

### 3. Технологія підсилення

3.1. Підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій полімерною композицією проникаючої дії на основі поліізоціанату полягає в просоченні бетонної поверхні мономером (рідиною). Внаслідок просочення мономером бетонної поверхні залізобетонного елементу відбувається зміна фізико-механічних характеристик бетону.

3.2. Бетонні та залізобетонні конструкції, що підсилюються не повинні мати вибоїн, раковин і тріщин шириною більше 0,5 мм. Перед підсиленням (просоченням) зазначені дефекти необхідно заробити цементно-піщаним розчином з попереднім очищенням місця дефекту.

3.3. Для кращого проникнення полімерного матеріалу поверхня конструкцій повинна мати відкриту капілярну структуру. До початку нанесення композиції зі всіх граней конструкцій, що підсилюються необхідно зняти "цементне молочко", щоб поверхня набула шорсткості.

3.4. Полімерна композиція наноситься пошарово за допомогою пензля, по мірі її проникнення, через кожні 10...15 хвилин до повного насичення зразку (3 - 4 шари). Ознакою насичення бетону композицією є поява глянцевої поверхні темно - коричневого кольору. Після полімеризації на поверхні підсилених конструкцій утворюється глянцеве покриття темно - коричневого кольору.

3.5. Витрата полімерної композиції складається із кількості поглинутої бетоном, втратою при нанесенні та випаровуванні мономеру. Загальна витрата композиції для підсилення визначена експериментальним шляхом і складає 500...800 мл на кв. м.

3.6. Технічні характеристики бетону просоченого полімерною композицією наведено в (табл. 1).



Таблиця 1 - Характеристики бетону, просоченого полімерною композицією

Водопоглинання, не більше	0,05 %
Морозостійкість, не менше	300 - 500 циклів
Водонепроникність	0 %
Міцність при стиску	збільшення не менше, ніж в 1,5 рази
Адгезія до бетону	2 МПа
Тріщиностійкість	збільшується
Час полімеризації, не більше (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	24 год

#### 4. Експериментальне обґрунтування підсилення конструкцій полімерною композицією проникаючої дії на основі поліізоціанату

4.1. Згідно експериментальних даних [3, 4, 8], що отримані при випробуванні різних класів бетону на стиск, значення міцності підсиленого бетону на стиск  $f_{ck,p}$  - збільшується, але не суттєво. Тому в розрахунках з метою забезпечення надійності підсиленої конструкції значення міцності бетону пропонується приймати рівним значенню міцності відповідного класу бетону з якого виготовлено конструкцію табл. 3.1. [6]

$$f_{ck,p} \approx f_{ck}, \quad (1)$$

де  $f_{ck}$  - характеристичне значення міцності бетону на стиск;

4.2. Значення початкового модуля пружності підсиленого бетону  $E_{ck,p}$  збільшується, повинно прийматися за експериментальними даними, за відсутності даних визначається за формулою

$$E_{ck,p} = p_E \cdot E_{ck}, \quad (2)$$

де  $E_{ck,p}$  - значення початкового модуля пружності підсиленого бетону;

$p_E$  - коефіцієнт, що враховує збільшення початкового модуля пружності, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти рівним 1,3;

$E_{ck}$  - характеристичне значення початкового модуля пружності бетону.

4.3. Значення відносних деформацій стиску підсиленого бетону  $\varepsilon_{c1,p}$ , слід приймати згідно діаграми стану (деформування), за відсутності діаграми стану (деформування) підсиленого бетону значення відносних деформацій визначається за формулою

$$\varepsilon_{c1,p} = p_\varepsilon \cdot \varepsilon_{c1}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{c1,p}$  - значення відносних деформацій стиску підсиленого бетону при максимальних напруженнях;

$p_\varepsilon$  - коефіцієнт, що враховує зменшення відносних деформацій бетону, приймається за експериментальними даними діаграми стану (деформування), за відсутності даних можна прийняти рівним 0,9;

$\varepsilon_{c1}$  - характеристичне значення відносних деформацій стиску бетону при максимальних напруженнях.

4.4. За експериментальними даними [5, 7, 9] встановлено, що за рахунок значних адгезійних властивостей, полімерна композиція, краще підвищує міцність бетону на розтяг, ніж на стиск. Значення міцності підсиленого бетону на розтяг  $f_{ctm,p}$  - збільшується, в розрахунках пропонується приймати за формулою

$$f_{ctk,p} = p_f \cdot f_{ctk}, \quad (4)$$

де  $f_{ctk,p}$  - значення міцності підсиленого бетону на осьовий розтяг;

$p_f$  - коефіцієнт, що враховує зміцнення міцності бетону на розтяг, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти рівним 1,3;

$f_{ctk}$  - середнє значення міцності бетону на осьовий розтяг.



## 5. Рекомендації щодо розрахунку граничних станів за придатністю до експлуатації (друга група)

5.1. Розрахунок підсилених залізобетонних балок, полімерною композицією, слід виконувати згідно положень норм [6, 10] з врахуванням фізико-механічних характеристик підсиленого (просоченого) бетону.

5.2. Дані рекомендації розповсюджуються на розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією проникаючої дії на основі поліізоціанату.

5.3. Розрахунок підсилених залізобетонних балок за другою групою граничних станів виконується згідно з вимогами, наведеними в п. 7 [6].

5.4. Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за утворенням нормальних тріщин виконується за нелінійною деформаційною моделлю на основі діаграм стану арматури, розтягнутого та стиснутого бетону, а також гіпотези плоских перерізів. Критерієм утворення тріщин є досягнення граничних відносних деформацій у розтягнутому бетоні  $\varepsilon_{ctu,p}$  на рівні нижнього шару робочої арматури

$$\varepsilon_{ctu,p} = -2f_{ctk,p}/E_{ck,p}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{ctu,p}$  - значення відносних граничних деформації розтягу підсиленого бетону;

$f_{ctk,p}$  - значення міцності підсиленого бетону на осьовий розтяг;

$E_{ck,p}$  - значення початкового модуля пружності підсиленого бетону.

5.5. Попередньо для розрахунку граничних станів за придатністю до експлуатації необхідно розрахувати залізобетонний елемент на вплив згинального моменту. Момент тріщиноутворення  $M_w$ , виходячи з деформаційної моделі (рис. 1.) для елементів прямокутного профілю з одиничним армуванням визначається за формулою

$$M_w = f_{ck} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{c1,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k +$$

$$+ f_{ctk,p} b (h-x)^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{sr,p}}{\varepsilon_{ctu,p}} \right)^k + E_s A_s \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c)^2, \quad (6)$$

де  $M_w$  - момент утворення перших тріщин;

$f_{ck}$  - значення міцності бетону на стиск;

$b$  - ширина перерізу;

$x$  - висота стиснутої зони перерізу;

$a_k$  - коефіцієнти поліноміальної залежності;

$\varepsilon_{c1,p}$  - значення відносних деформацій стиску бетону в перерізі "без тріщин";

$\varepsilon_{c1,p}$  - значення відносних деформацій стиску бетону при максимальних напруженнях;

$f_{ctk,p}$  - значення міцності підсиленого бетону на осьовий розтяг;

$h$  - загальна висота перерізу;

$\varepsilon_{sr,p}$  - значення відносних деформацій розтягу бетону в перерізі "без тріщин";

$\varepsilon_{ctu,p}$  - значення відносних граничних деформації розтягу підсиленого бетону;

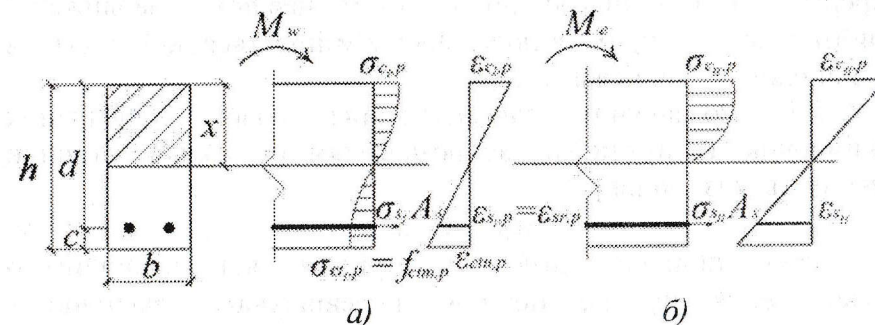


Рисунок 1 - Напружено-деформований стан залізобетонного елементу в граничному стані "без тріщин" (а), "з тріщинами" (б)

$E_s$  - початковий модуль пружності арматури;

$A_s$  - площа поперечного перерізу арматури;

$c$  - захисний шар бетону для арматури.



5.6. Знаходження моменту тріщиноутворення  $M_w$  здійснюється методом простої ітерації або методом послідовних наближень. Враховуючи напружено - деформований стан залізобетонного елементу прямокутного перерізу (див. рис. 1 а.) та використовуючи гіпотезу плоских перерізів, можна записати

$$\varepsilon_{sr,p} = \varepsilon_{sI} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h - x - c), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cI,p} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} x, \quad (8)$$

Для визначення  $\varepsilon_{cI,p}$  та  $\varepsilon_{sI,p}$  необхідно знайти висоту стиснутої зони бетону  $x$ . Висота стиснутої зони бетону  $x$  визначається, виходячи з умови рівноваги внутрішніх зусиль в перерізі. Використовуючи деформаційну модель у вигляді полінома п'ятого ступеня [6], умову можна записати у вигляді:

$$f_{ck} b x \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{cI,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k =$$

$$= f_{ctk,p} b (h - x) \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{sr,p}}{\varepsilon_{ctu,p}} \right)^k + E_s A_s \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h - x - c), \quad (9)$$

За допомогою залежностей (7) та (8) попередньо задаючись величина  $x$ , методом послідовних наближень, досягаємо виконання умови рівноваги внутрішніх зусиль в перерізі (9) з точністю до 2 %. В першому наближенні приймається  $x = 0,5d$  і в подальшому змінюється до виконання умови рівноваги в межах  $\pm 2$  %.

5.7. Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям нормальних тріщин виконується із умови [6]

$$w_k \leq w_{k,lim}, \quad (10)$$

за якою ширина розкриття тріщин від зовнішнього навантаження  $w_k$  не повинна перевищувати гранично - допустимого значення ширини розкриття тріщин  $w_{k,lim}$  наведеного в п. 5. [10].

5.8. Блок - схема розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за утворенням тріщин наведена в додатку А.

5.9. Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям нормальних тріщин виконується згідно норм [10] за формулою

$$w_k = p_w \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}), \quad (11)$$

де  $p_w$  - коефіцієнт, що враховує зменшення ширини розкриття тріщин у підсилених конструкціях, приймається за експериментальними даними, за відсутності даних можна прийняти рівним 0,8;

$s_{r,max}$  - максимальний крок між тріщинами;

$\varepsilon_{sm}$  - середні деформації в арматурі при відповідному сполученні навантажень;

$\varepsilon_{ctm}$  - середні деформації розтягнутого бетону між тріщинами;

5.9.1. Максимальний крок між тріщинами визначається за такими виразами:

- у випадках, коли арматура, що має зчеплення з бетоном розміщена зосереджено в межах розтягнутої зони крок  $\leq 5(c + \phi/2)$ , максимальний кінцевий крок тріщин можна визначити за виразом

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2\phi/\rho_{p,eff}, \quad (12)$$

де  $c$  - захисний шар бетону для поздовжньої арматури;

$k_1$  - коефіцієнт, що враховує характеристики зчеплення арматури, який рівний:

0,8 (для стрижнів із високим зчепленням);

1,6 (для стрижнів із фактично гладкою поверхнею);

$k_2$  - коефіцієнт, що враховує розподіл деформацій:

0,5 (для згину);

1,05 (для чистого розтягу);

$\phi$  - діаметр стрижня;

$\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$  - ефективний коефіцієнт армування, де  $A_s$  - площа розтягнутої арматури в межах фактичної площі бетону;  $A_{c,eff}$  - фактична площа розтягнутого бетону див. п. 5. [10].

- у випадках, коли відстань між стержнями, що мають зчеплення з бетоном, перевищує  $5(c + \phi/2)$ , то максимальну відстань між тріщинами можна визначити за виразом

$$s_{r,max} = 1,3(h - x), \quad (13)$$



де  $h$  - загальна висота перерізу;  
 $x$  - висота стиснутої зони перерізу;

5.9.2. Другий параметр у рівнянні (11) - середня величина деформацій  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}$  визначається за формулою

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_p,eff} (1 + \alpha_e \rho_p,eff)}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (14)$$

де  $\sigma_s$  - напруження у розтягнутій арматурі в перерізі "з тріщинами";

$k_t$  - коефіцієнт, що залежить від тривалості навантаження:

0,6 (для короткотривалого);

0,4 (для довготривалого);

$f_{ct,eff}$  - середня величина міцності бетону на розтяг, що має місце в момент часу, коли очікується поява тріщин

$$f_{ct,eff} = f_{ctk,p};$$

$\alpha_e$  - відношення модуля пружності арматури та бетону  $E_s/E_{cm,p}$ .

5.10. Блок - схема розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям тріщин наведена в додатку Б.

5.11. Розрахунок залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за деформаціями визначається за загальними правилами будівельної механіки. Прогини балок, в основному, залежать від згинальних деформацій - значення прогинів визначається за кривизною балки.

5.12. Кривизна та поздовжні деформації залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, визначаються за нелінійною деформаційною методикою, виходячи з рівнянь рівноваги зовнішніх зусиль, які діють у нормальному перерізі балки, гіпотези плоских перерізів, діаграм стану бетону та арматури, за формулою [15]

$$\kappa = \xi \kappa_{II,p} + (1 - \xi) \kappa_{I,p}, \quad (15)$$

де  $\kappa$  - загальна кривизна балки;

$\xi$  - коефіцієнт розподілення, визначається за формулою

$$\xi = 1 - \beta \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2, \quad (16)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт, що враховує вплив на середню відносну деформацію тривалості навантаження або повторності навантаження:

1,0 (для одноразового короткочасного навантаження);

0,5 (для постійних або багатьох циклів повторних навантажень);

$\sigma_{sr}$  - напруження в розтягнутій арматурі, яке розраховується для перерізу "без тріщини" за умови навантаження в момент утворення першої тріщини;

$\sigma_s$  - напруження в розтягнутій арматурі, яке розраховується для перерізу "з тріщиною";

$\kappa_{I,p}$  - кривизна балки "без тріщини";

$\kappa_{II,p}$  - кривизна балки "з тріщиною".

5.13. Напруження в арматурі  $\sigma_{sr}$ , яке розраховується для перерізу "без тріщини" за знайденими значеннями (див. п. 5.6.)

$x$ ,  $\varepsilon_{cI,p}$  та  $\varepsilon_{sI,p}$  визначається за формулою

$$\sigma_{sr} = \varepsilon_{sI,p} E_s, \quad (17)$$

5.14. Кривизна балки "без тріщини" визначається за формулою

$$\kappa_{I,p} = \frac{\varepsilon_{cI,p} + \varepsilon_{sI,p}}{d}, \quad (18)$$

де  $d$  - робоча висота поперечного перерізу балки;

5.15. Для знаходження кривизни балки "з тріщиною"  $\kappa_{II,p}$  за дії експлуатаційного згинального моменту в перерізі  $M_e$  визначаємо  $\varepsilon_{cII,p}$  та  $\varepsilon_{sII,p}$ . Для цього розглядаємо переріз "із тріщиною" (рис. 1б), в цьому стані невідомі висота стиснутої зони перерізу  $x$ , значення відносних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cII,p}$  та значення відносних деформацій розтягнутої арматури  $\varepsilon_{sII,p}$ . Методом простої ітерації (послідовних наближень), за допомогою ЕОМ, знаходимо дані параметри за формулою [8]

$$M_s = f_{ck} b x^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{c,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k + \varepsilon_s E_s A_s (d - x), \quad (19)$$

Задаючись значеннями відносних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{c,p}$  від 0 до  $\varepsilon_{c1,p}$  через інтервал  $0,1\varepsilon_{c1,p}$  визначаються



відповідні значення відносних деформацій розтягнутої арматури  $\varepsilon_s$  (за гіпотезою плоских перерізів):

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{c,p}}{x} (d - x), \quad (20)$$

при цьому повинна виконуватися умова [8]

$$f_{ck} b x \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{c,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k = \varepsilon_s E_s A_s, \quad (21)$$

За отриманими даними, аналітично або графічно, при величині експлуатаційного моменту  $M_e$  знаходяться  $\varepsilon_{cII,p}$  та  $\varepsilon_{sII,p}$

5.16. Напруження в арматурі  $\sigma_s$ , яке розраховується для перерізу "з тріщиною" за дії експлуатаційного моменту  $M_e$  визначається за формулою

$$\sigma_s = \varepsilon_{sII,p} E_s, \quad (22)$$

5.17. Кривизна балки "з тріщиною" визначається за формулою

$$\kappa_{II,p} = \frac{\varepsilon_{cII,p} + \varepsilon_{sII,p}}{d}, \quad (23)$$

5.18. Прогин статично визначних балок визначається за формулою

$$f = \kappa k_m l^2, \quad (24)$$

де  $\kappa$  - загальна кривизна балки;

$k_m$  - коефіцієнт, що залежить від характеру навантаження, визначається за таблицею 5.5 [6];

$l$  - розрахунковий проліт балки.

5.19. Блок - схема розрахунку залізобетонних балок, підсилені полімерною композицією, за деформаціями наведена в додатку В.

## 6. Приклад розрахунку

Необхідно розрахувати залізобетонну балку, підсилену полімерною композицією, за граничними станами другої групи (за придатністю до експлуатації). При обстеженні конструкції встановлено міцність бетону, яка відповідає класу С30/35, ширина розкриття тріщин  $w_k = 0,4$  мм, прогин -  $f = 18,0$  мм. Геометричні розміри балки  $200 \times 500 \times 4500$  мм, армування

виконано робочою арматурою  $4\emptyset 22$  мм класу А 500С. Розрахунковий проліт  $l = 4300$  мм. Клас умов експлуатації конструкції (клас впливу) - ХС2...XF4, для якого ширина розкриття тріщин не повинна перевищувати 0,3 мм. Гранично-допустимий прогин конструкції  $f_u$  не повинен перевищувати  $1/250 \cdot l$ . Експлуатаційний момент від зовнішнього навантаження складає  $M_e = 190$  кН·м.

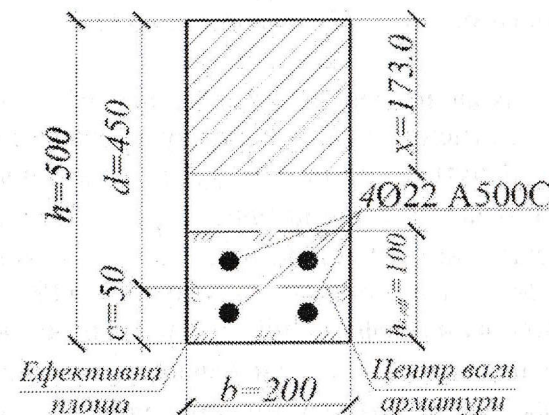


Рисунок 2 - Поперечний переріз залізобетонної балки

За відповідним значенням міцності бетону з табл. 3.1. [6] вибираємо характеристики міцності та деформативності.

Дано: Бетон класу С 30/35 з характеристиками:  $f_{ck} = 25,5$  МПа;  $f_{ctm} = 2,8$  МПа;  $E_{ck} = 31,0$  ГПа;  $\varepsilon_{c1} = 1,81\text{‰}$ ;

Арматура класу А 500С:  $A_s = 1520,0$  мм<sup>2</sup>;  $f_{yk} = 500,0$  МПа;  $E_s = 190000$  МПа;

Параметри перерізу:  $h = 500$  мм;  $b = 200$  мм;  $c = 50$  мм; (рис. 2.).

Розрахунковий проліт  $l = 4300$  мм.  $M_e = 190$  кН·м;

Розв'язок:

Підсилення залізобетонної балки виконується полімерною композицією проникаючої дії на основі поліізоціанату. На першому етапі необхідно визначити кількість полімерної композиції. Витрата композиції складає 500...800 мл на м<sup>2</sup> в залежності від структури бетону див. п. 3. даних рекомендацій.



Площа поверхні балки, що підсилюється складає  $6,5 \text{ м}^2$ , отже необхідна кількість композиції складає:  $6,5 \text{ м}^2 \times 700 \text{ мл} \approx 5,0 \text{ л}$ .

Розрахунок ширини розкриття тріщин залізобетонної балки, підсиленої полімерною композицією виконується за формулою (11):

$$w_k = p_w \cdot s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm})$$

Для цього знаходимо напруження в арматурі  $\sigma_s$  за дії експлуатаційного моменту  $M_e$  за формулою (22):

$$\sigma_s = \varepsilon_{sII,p} E_s$$

Далі розглядаємо переріз "з тріщинами", в цьому стані невідомі висота стиснутої зони перерізу  $x$ , значення відносних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cII,p}$  та значення відносних деформацій розтягнутої арматури  $\varepsilon_{sII,p}$ . Методом простої ітерації (послідовних наближень), за допомогою ЕОМ, знаходимо дані параметри за формулою (19). Задаючись значеннями відносних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{c,p}$  від 0 до  $\varepsilon_{c1,p}$  через інтервал  $0,1\varepsilon_{c1,p}$  визначаємо відповідні значення відносних деформацій розтягнутої арматури  $\varepsilon_{sII,p}$  та величину згинальних моментів  $M$  (табл. 1.) За отриманими даними, аналітично, шляхом інтерполяції з табл. 1 при величині експлуатаційного моменту  $M_e = 190 \text{ кН}\cdot\text{м}$  знаходимо  $\varepsilon_{cII,p} = 1,23 \text{ ‰}$  та  $\varepsilon_{sII,p} = 1,89 \text{ ‰}$ .

Таблиця 2 - Величини  $\varepsilon_{c,p}$ ,  $\varepsilon_s$ ,  $x$  та  $M$

	$\varepsilon_{c,p}, \text{‰}$	$\varepsilon_s, \text{‰}$	$x, \text{мм}$	$M, \text{кН}\cdot\text{м}$
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,163	0,311	154,7	35,7
0,2	0,326	0,604	157,7	69,1
0,3	0,489	0,879	160,8	100,1
0,4	0,652	1,135	164,1	128,6
0,5	0,815	1,373	167,5	154,8
0,6	0,977	1,593	171,1	178,6
0,7	1,140	1,796	174,8	200,8
0,8	1,303	1,982	178,5	219,5
0,9	1,466	2,152	182,3	236,7
1,0	1,629	2,307	186,3	251,9

Значення відносних деформацій стиску підсиленого бетону  $\varepsilon_{c1,p}$  при максимальних напруженнях визначено за формулою (3)

$$\varepsilon_{c1,p} = p_\varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} = 0,9 \cdot 0,00181 = 0,00163$$

Визначаємо напруження в арматурі:

$$\sigma_s = \varepsilon_{sII,p} \cdot E_s = 0,00189 \cdot 190000 = 359,1 \text{ МПа.}$$

На наступному етапі визначаємо середню величину деформацій  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm})$  за формулою (14):

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s},$$

де  $k_t = 0,6$  (для короткотривалого навантаження);

$$f_{ct,eff} = f_{ctm,p};$$

$$f_{ctk,p} = p_f \cdot f_{ctk} = 1,3 \cdot 2,8 = 3,64 \text{ МПа};$$

$p_f$  - коефіцієнт, що враховує зміцнення міцності бетону на розтяг (див. п. 4.).

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{1520,0}{21620,0} = 0,0703,$$

$$A_{c,eff} = b h_{c,eff} = 200,0 \cdot 108,1 = 21620,0 \text{ мм}^2,$$

$h_{c,eff}$  - менше із значень:

$$2,5(h - d) = 2,5(500 - 450) = 125,0 \text{ мм};$$

$$(h - x)/3 = (500 - 173,0)/3 = 108,1 \text{ мм};$$

$$h/2 = 500/2 = 250,0 \text{ мм};$$

$x = 173,0 \text{ мм}$  - висота стиснутої зони за дії експлуатаційного навантаження  $M_e = 190 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (визначено інтерполяцією);

$$\alpha_e = E_s/E_{ck,p} = 190000/40300 = 4,71;$$

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) = 0,00168 \geq 0,00110$$

На наступному етапі визначаємо максимальний крок між тріщинами, у нашому випадку за формулою (8):

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2\phi/\rho_{p,eff},$$

де  $c = 50 \text{ мм}$ ;

$k_1 = 0,8$  (для стрижнів із високим зчепленням);

$k_2 = 0,5$  (для згину);

$$s_{r,max} = 3,4 \cdot 50 + 0,425 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 22/0,0703 = 223,2 \text{ мм}$$

Ширини розкриття тріщин складає:



$$w_k = 0,8 \cdot 223,2 \cdot 0,00168 = 0,28 \text{ мм} \leq w_{k, \text{lim}} = 0,3 \text{ мм}.$$

Умова (6) виконується, тріщини в балці після підсилення обмежені.

Прогин статично визначної балки, підсиленої полімерною композицією визначаємо за формулою (17):

$$f = \aleph k_m l^2$$

На першому етапі визначаємо загальну кривизну балки  $\aleph$  за формулою (15):

$$\aleph = \xi \aleph_{II,p} + (1 - \xi) \aleph_{I,p}$$

Для цього знаходимо кривизну балки в стані "без тріщин" за формулою (18)

$$\aleph_{I,p} = \frac{\varepsilon_{cI,p} + \varepsilon_{sI,p}}{d}$$

Враховуючи напружено - деформований стан залізобетонної балки прямокутного перерізу (див. рис.1 а.) та використовуючи гіпотезу плоских перерізів визначаємо  $\varepsilon_{cI,p}$  та  $\varepsilon_{sI,p}$ . За допомогою залежностей (7) та (8) попередньо задаючись величиною стиснутої зони перерізу  $x$ , методом простої ітерації, досягаємо виконання умови рівноваги внутрішніх зусиль в перерізі (9):

$$f_{ck} b x \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{cI,p}}{\varepsilon_{c1,p}} \right)^k = f_{ctk,p} b (h-x) \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_{sr,p}}{\varepsilon_{ctu,p}} \right)^k$$

$$+ E_s A_s \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c)$$

$$\varepsilon_{ctu,p} = -2f_{ctk,p}/E_{ck,p} = -2 \cdot 3,64/40300 = 0,000181$$

$$\varepsilon_{sr,p} = \varepsilon_{sI,p} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} (h-x-c) =$$

$$= \frac{0,000181}{500,0 - 245,0} \cdot (500,0 - 245,0 - 50) = 0,000145$$

$$\varepsilon_{cI,p} = \frac{\varepsilon_{ctu,p}}{h-x} x = \frac{0,000181}{500 - 245,0} \cdot 245,0 = 0,00017$$

Кривизна балки "без тріщин" складає

$$\aleph_{I,p} = \frac{\varepsilon_{cI,p} + \varepsilon_{sI,p}}{d} = \frac{0,00017 + 0,000145}{450} = 7,08 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^{-1}$$

Кривизна балки "з тріщинами" визначається за формулою (23):

$$\aleph_{II,p} = \frac{\varepsilon_{cII,p} + \varepsilon_{sII,p}}{d}$$

Значення відносних деформацій  $\varepsilon_{cII,p} = 1,23 \text{ ‰}$  та  $\varepsilon_{sII,p} = 1,89 \text{ ‰}$  беремо з розрахунку за тріщиностійкістю (табл.1).

Кривизна балки "з тріщинами" складає

$$\aleph_{II,p} = \frac{0,00123 + 0,00189}{450} = 69,3 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^{-1}$$

На наступному етапі визначаємо коефіцієнт розподілення  $\xi$  за формулою (16):

$$\xi = 1 - \beta \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - 1,0 \cdot \frac{27,6}{359,1} = 0,994$$

де  $\sigma_{sr} = \varepsilon_{sI,p} E_s = 0,000145 \cdot 190000 = 27,6 \text{ МПа}$ ;

$\sigma_s = \varepsilon_{sII,p} E_s = 0,00189 \cdot 190000 = 359,1 \text{ МПа}$ ;

$\beta = 1,0$  - (для одноразового короткочасного навантаження).

Загальна кривизна балки  $\aleph$  складає

$$\aleph = \xi \aleph_{II,p} + (1 - \xi) \aleph_{I,p} = 0,994 \cdot 69,3 \cdot 10^{-7} + (1 - 0,994) \cdot 7,08 \cdot 10^{-7} = 69,0 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^{-1}.$$

Прогин балки, підсиленої полімерною композицією складає

$$f = \aleph k_m l^2 = 69,0 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{5}{48} \cdot 4300^2 = 13,3 \text{ мм}.$$

де  $\aleph$  - загальна кривизна балки;

$k_m$  - коефіцієнт, що враховує спосіб навантаження, визначається за табл. 5.5 [6];

$l$  - розрахунковий проліт балки.

$$f = 13,3 \text{ мм} \leq f_u = 1/250 \cdot l = 17,2 \text{ мм}$$

Умова виконується, прогин балки після підсилення не перевищує гранично - допустиме значення.



## Література

1. Бамбура А.Н. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия // А.Н. Бамбура, В.Я. Бачинский, Н.В. Журавлева, И.Н. Пешков. – К.: НИИСК, 1987. – 25 с.
2. Бабич Є.М. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із використанням деформаційної моделі / Є.М. Бабич, В.С. Довбенко, В.В. Савицький // Рекомендації. – Рівне, 2005. – 37 с.
3. Бабич Є.М. Вплив полімерної композиції "Силор" на міцність, деформативність та тріщиностійкість залізобетонних балок при дії статичних навантажень / Є.М. Бабич, В.С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. 18. – с. 442 – 448.
4. Бабич Є.М. Міцність та деформативність залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією / Є.М. Бабич, В.С. Довбенко // Комунальне господарство міст: Наук. - тех. зб. – Харків: ХНАМГ, 2011. – Вип. 101. – с. 7 - 14.
5. Бабич Е.М. Трещиностойкость усиленных железобетонных балок / Е.М. Бабич, В.С. Довбенко // Вестник Белорусско-Российского университета № 1 (42). - Республика Беларусь, Могелов: Белорусско-Российский университет, 2014. - с. 117 - 125.
6. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
7. Довбенко В.С. Дослідження полімерної композиції "Силор" як ефективного засобу ремонту, відновлення та підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій / В.С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2010. – Вип. 20. – с. 181 – 186.
8. Довбенко В.С. Дослідження роботи залізобетонних балок, підсилених полімерної композиції при дії малоциклових навантажень / В.С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали,

конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – с. 787 – 794.

9. Довбенко В.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных полимерной композицией / В.С. Довбенко // Строительство и архитектура: науч.-техн. журнал №1 (51). - РФ, Орел: ФГБОУ ВПО "Госуниверситет - УНПК". - 2014. - с. 22 -28.

10. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010 Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. - Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.

11. Патент на винахід № 40068 А України «Спосіб ізоляції і зміцнення та полімерна композиція для його здійснення "Силор", 16.07.2001 р., Бюл. № 6.

12. Патент № 68225 Україна Поліізоціанатна композиція для просочування бетону і спосіб просочування бетону / Веселовський Р.А.; заявник та патентоволодар Веселовський Р.А.- № 20031110531; заявл.31.10.05; опубл.15.11.06, Бюл. №11.- 4с.

13. ТУ У В.2.7.-24.6-01497391-001-2001 "Покриття захисне комбіноване на основі зв'язуючих "Силор" і "УТК-М".

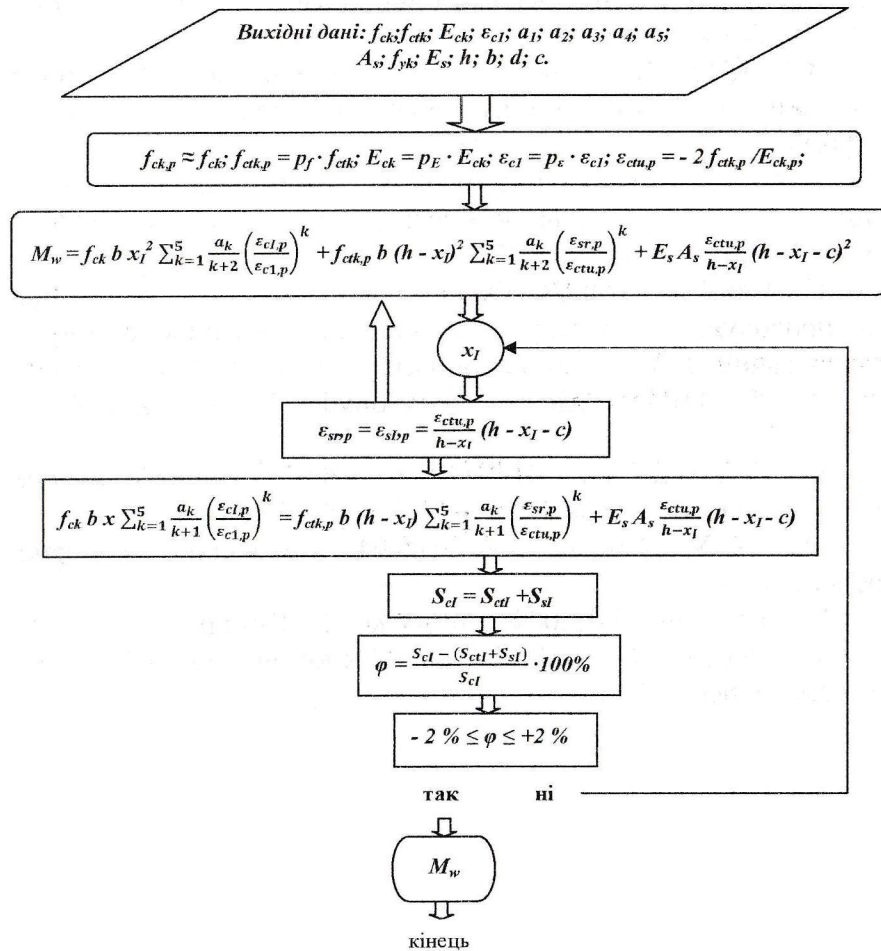
14. ТУ У 24.1-19478158-001-2004. Композиція полімерна. Технічні умови.

15. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. - Brussels-2004, December. - 225 p.



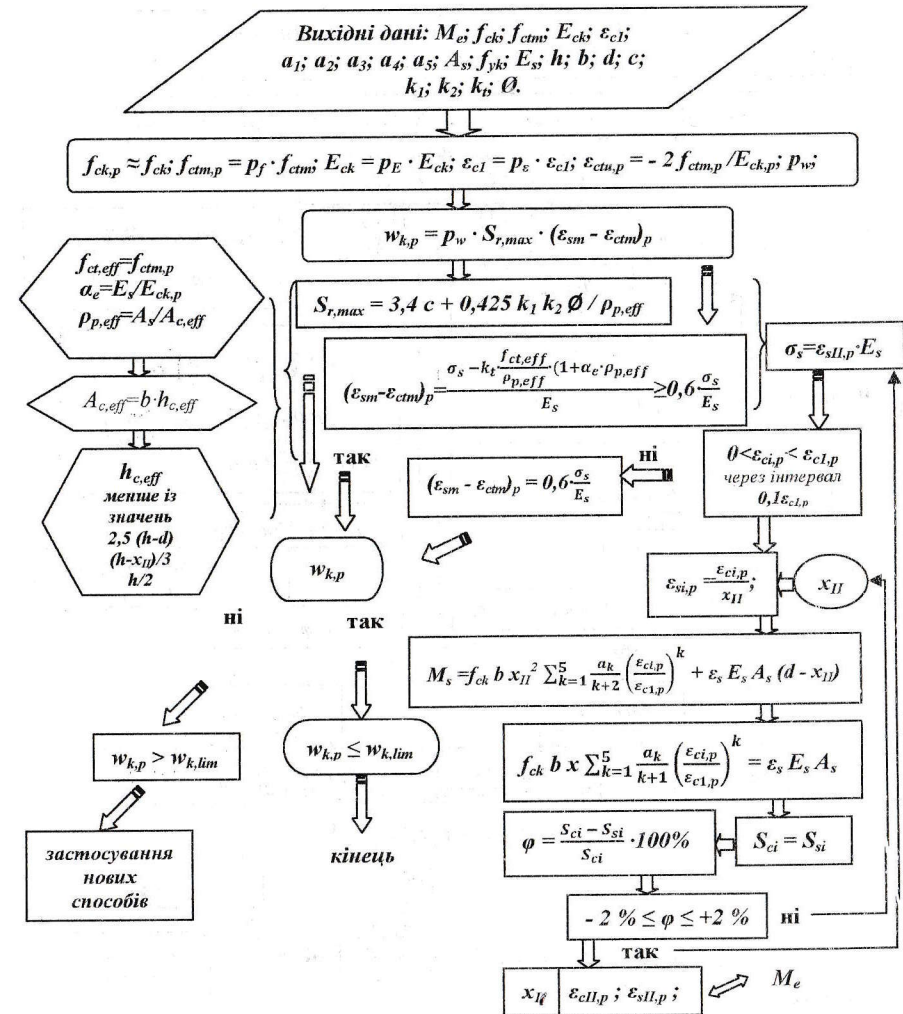
# ДОДАТОК А Блок - схема

розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за утворенням тріщин



# ДОДАТОК Б Блок - схема

розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за розкриттям тріщин





# ДОДАТОК В

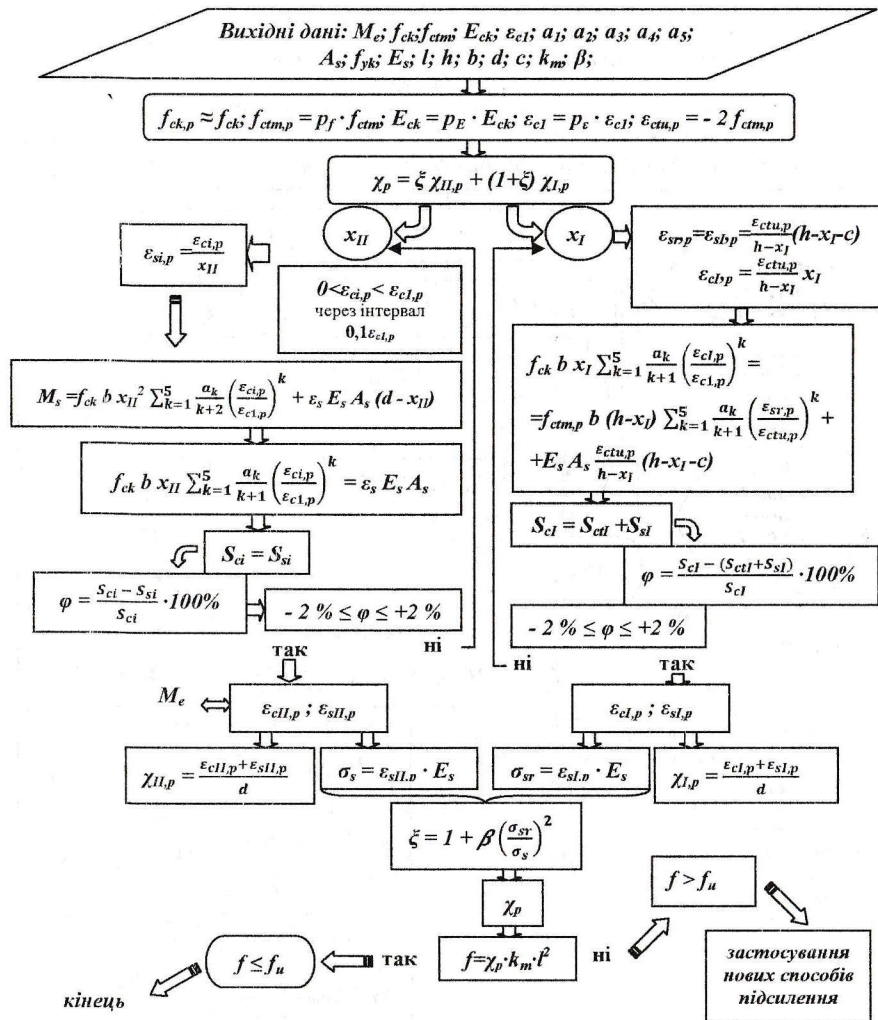
## Блок - схема

розрахунку залізобетонних балок, підсилених полімерною композицією, за деформаціями

Бабич Євгеній Михайлович  
Довбенко Володимир Сергійович

## РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСІЛЕНИХ ПОЛІМЕРНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ

Рекомендації





Підписано до друку 26.09.2014 р. Формат 60×90  
Папір друкарський №1. Гарнітура Times New Roman  
Друк трафаретний. Умовн. друк. арк. 1,1.  
Тираж 100 прим. Замовл. №45

---

*Віддруковано ПП Барішева Н.К.  
33024, м. Рівне, вул. Кн. Острозького, 4/6, кв. 65.  
Тел. (0362) 43-05-17*

*Свідоцтво: серія ВОО № 735183 від 10.02.2004 р.*